

# 積算流量に着目した排出ガス後処理システムの状態予測型触媒温度制御

State predictive control of the temperature in diesel engine exhaust gas aftertreatment systems

児島研究室 M2 小針 英靖

## 1. はじめに

### 研究背景

- 交通需要拡大による大気汚染が深刻化。
- 排出ガス規制のさらなる厳格化が予定される<sup>[1]</sup>。
- SCR (Selective Catalytic Reduction)
- ディーゼルエンジンのNO<sub>x</sub>ガス後処理触媒。
- 200~400°Cで高い浄化性能を有する。



図1 交通流

### 研究目的・アプローチ

- 排出ガス温度を調節しSCR温度の過渡応答を改善する。
- 排出ガスの積算流量軸で状態予測制御を適用する。

## 2. SCR制御モデル

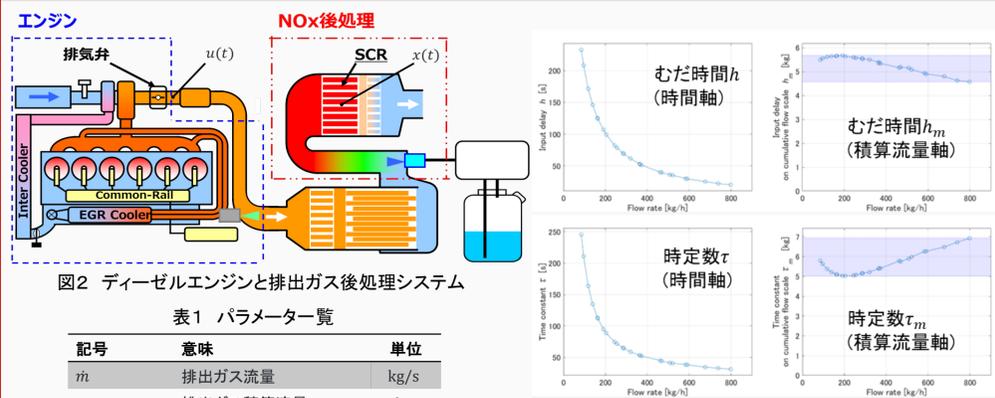


図2 ディーゼルエンジンと排出ガス後処理システム

表1 パラメーター一覧

| 記号             | 意味          | 単位   |
|----------------|-------------|------|
| $\dot{m}$      | 排出ガス流量      | kg/s |
| $m$            | 排出ガス積算流量    | kg   |
| $u(t), u_m(m)$ | 排出ガス温度      | °C   |
| $x(t), x_m(m)$ | SCR平均温度     | °C   |
| $r(t), r_m(m)$ | SCR目標温度     | °C   |
| $h$            | むだ時間        | s    |
| $h_m$          | むだ時間(積算流量軸) | kg   |
| $\tau$         | 時定数         | s    |
| $\tau_m$       | 時定数(積算流量軸)  | kg   |
| $\eta$         | 放熱係数        |      |

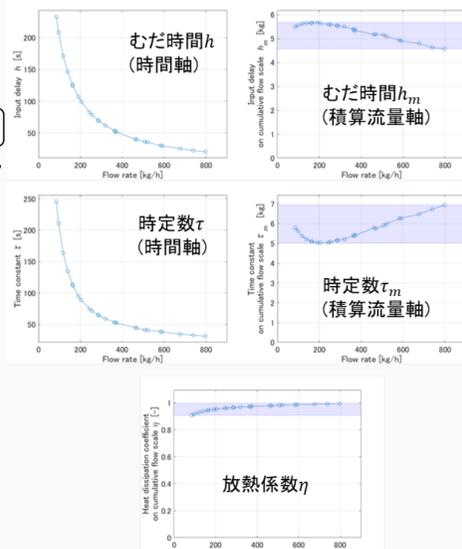


図3 パラメータ同定結果

### 特徴

- 排出ガスの熱がSCRへ伝達するまでに大きなむだ時間が発生する。
- むだ時間を考慮した制御系の設計が必要になる。

### 熱伝達モデル<sup>[2]</sup>

SCRが十分断熱されているとき、入力むだ時間系。

$$\frac{d}{dt} x(t) = \frac{1}{\tau(\dot{m})} \left( -x(t) + \eta \cdot u(t - h(\dot{m})) \right) \quad \left( \tau(\dot{m}) = \frac{\tau_m}{\dot{m}(t)} \right)$$

### 積算流量軸による定式化

積算流量  $m(t) := \int_0^t \dot{m}(t) dt$  ( $\dot{m}(t) \geq 0$ ) を新たな時間軸にする。

$$\frac{dx_m}{dm} := \frac{dx}{dt} \cdot \frac{dt}{dm} = \left( -\frac{\dot{m}(t)}{\tau_m} \cdot x(t) + \frac{\dot{m}(t) \cdot \eta}{\tau_m} \cdot u(t - h(\dot{m})) \right) \cdot \frac{1}{\dot{m}(t)}$$

$$\therefore \frac{d}{dm} x_m(m) = A x_m(m) + B u_m(m - h_m) \quad \left( A = -\frac{1}{\tau_m}, B = \frac{\eta}{\tau_m} \right)$$

積算流量軸では流量  $\dot{m}$  によらず  $h_m, \tau_m$  が一定値に近づく。

## 3. サーボ系(基本構成)

### 積算流量で規格化した積分器の追加

目標値  $r_c$  (一定値) と  $x(t)$  の偏差と流量  $\dot{m}(t)$  の積を積分する。

$$w(t) := \int_0^t \dot{m}(t) \cdot (r_c - x(t)) dt$$

$$\frac{dw_m}{dm} := \frac{dw}{dt} \cdot \frac{dt}{dm} = \dot{m}(t) \cdot (r_c - x(t)) \cdot \frac{1}{\dot{m}(t)} = r_{c,m} - x_m(m)$$

### サーボ系 $\Sigma_e$

$\Sigma_e$  を安定にすることで、 $x_m$  を  $r_{c,m}$  に定常偏差なく追従させる。

$$\Sigma_e: \dot{x}_{m,e}(m) = A_e x_{m,e}(m) + B_e u_m(m - h_m) + D_e r_{c,m}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m(m) \\ \dot{w}_m(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m(m) \\ w_m(m) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u_m(m - h_m) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r_{c,m}$$

## 4. 状態予測最適サーボ系

### 状態予測制御<sup>[3]</sup>

式(1)より系  $\Sigma_e$  を集中系  $\Sigma_p$  に変換し、 $\Sigma_p$  を安定にする入力を求める。

$$p_m(m) := x_{m,e}(m) + \int_{-h_m}^0 e^{-A_e(\beta+h_m)} B_e u_m(m+\beta) d\beta \quad \dots (1)$$

$$\Sigma_p: \dot{p}_m(m) = A_e p_m(m) + \tilde{B}_e u(m) + D_e r_m(m) \quad (\tilde{B}_e = e^{-A_e h_m} B_e)$$

### 最適レギュレータ問題

- 評価関数:  $J = \int_0^\infty \{ \tilde{p}_m^T(m) Q \tilde{p}_m(m) + \tilde{u}_m^T(m) R \tilde{u}_m(m) \} dm$  を最小にして閉ループ系を安定にする  $\tilde{u}_m(m)$  を求める。

- $\tilde{u}_m(m) = -R^{-1} \tilde{B}_e^T P \tilde{p}_m(m)$ ,  $\tilde{p}_{m,w}(0) = -P_{22}^{-1} P_{12}^T \tilde{p}_{m,x}(0)$  のとき

$$\min_{\tilde{p}_{m,w}(0)} \min_{\tilde{u}_m(m)} J = \tilde{p}_{m,x}(0)^T (P_{11} - P_{12} P_{22}^{-1} P_{12}^T) \tilde{p}_{m,x}(0) \quad [4].$$

$$\begin{cases} \tilde{p}_m(t) = p_m(t) - p_m(\infty), \quad \tilde{u}_m(t) = u_m(t) - u_m(\infty), \\ \tilde{p}_m = \begin{bmatrix} \tilde{p}_{m,x} \\ \tilde{p}_{m,w} \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix} \geq 0: PA_e + A_e^T P - P \tilde{B}_e R^{-1} \tilde{B}_e^T P + Q = 0 \end{cases}$$

### 制御入力

$$u_m(m) = K p_m(m) + H r_{c,m} + \delta p_m(0)$$

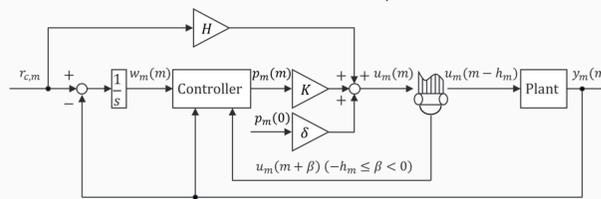


図5 状態予測最適サーボ系

## 5. シミュレーション

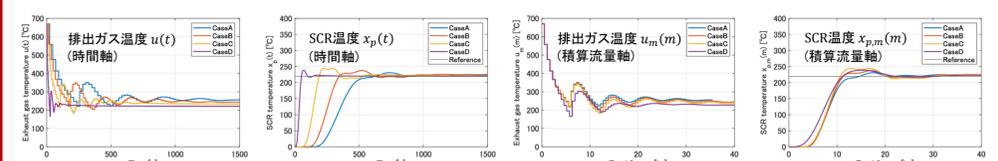


図2 シミュレーション条件 (Cases A~D)

| CASE             | A    | B     | C     | D     |
|------------------|------|-------|-------|-------|
| $\dot{m}$ [kg/s] | 85.0 | 118.0 | 204.0 | 798.0 |
| $h$ [s]          | 233  | 171   | 100   | 21    |
| $h_m$ [kg]       | 5.50 | 5.62  | 5.64  | 4.57  |
| $\tau$ [s]       | 246  | 164   | 89    | 31    |
| $\tau_m$ [kg]    | 5.37 | 5.39  | 5.03  | 6.93  |
| $\eta$ [-]       | 0.91 | 0.93  | 0.95  | 0.99  |

図6 シミュレーション結果 (Cases A~D)

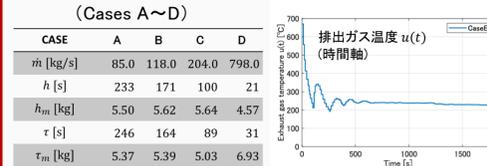


図7 シミュレーション結果 (Case E)

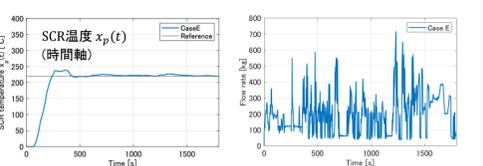


図8 流量  $m(t)$  (Case E)

### 条件

- エンジンシミュレータ上のモデルに対して状態予測最適サーボ系を適用。
- 流量が異なる場合 (Cases A~D) と時間変化する場合 (Case E) で確認。

### 結果・考察

- 流量が異なる場合や時間変化する場合で目標値に収束することを確認。
- Cases A~Dにおいて積算流量軸では同様の応答波形が確認された。このことから、積算流量で共通化したモデルで制御則を構成できることがわかる。

## 6. おわりに

### まとめ・展望

- 積算流量軸で状態予測制御を導出し、後処理システムに適用した。
- 排出ガス流量が変化する場合で、一定の目標値追従特性を確認した。
- 今後は、流量の時間変化やパラメータ変動を考慮した制御則を導き、その性能をエンジンシミュレータにより検証する。

### 参考文献

- 伊藤ほか: 尿素SCRシステムのNO<sub>x</sub>浄化率向上に関する研究(第7報)—鉄および銅ゼオライト系SCR触媒の比較とN<sub>2</sub>O排出要因の解明—, 自動車技術会学術論文集, Vol. 44, No. 2, pp. 351-356 (2013)
- Bernd Hollauf: Model-Based Closed-Loop Control of SCR Based DeNO<sub>x</sub> Systems, Master's Thesis submitted at the University of Applied Science Technikum Kärnten (2009)
- 阿部, 児島: 『むだ時間・分布定数系の制御』 コロナ社 (2007)
- 池田, 須田: 積分型最適サーボ系の設計, 計測自動制御学会論文集, Vol. 24, No. 1 (1988)
- 小針, 木村, 堤, 児島: 状態予測を用いた排出ガス後処理システムの触媒温度制御, 計測自動制御学会第10回制御部門マルチシミュレーション講演番号1-PS1-16 (2023)